

台湾海峡中气旋结构特征的单多普勒雷达分析^{* 1}

赵 坤¹ 周仲岛² 潘玉洁¹ 葛文忠¹

ZHAO Kun¹ BEN Jong-Dao Jou² PAN Yujie¹ GE Wenzhong¹

1. 教育部国家中尺度灾害性天气重点实验室, 南京大学大气科学系, 南京, 210093

2. 台湾大学大气科学系, 台北

1. *Key Laboratory for Mesoscale of Severe Weather/MOE, and Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China*

2. *Department of Atmospheric Sciences, National Taiwan University, Taipei, China*

2007-03-30 收稿, 2007-05-15 改回.

Zhao Kun, Ben Jong-Dao Jou, Pan Yujie, Ge Wenzhong. Single-Doppler radar analysis of a mesocyclone in the Taiwan Strait. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(4):637–651

Abstract The kinematic and precipitation structure of a mesocyclone associated with a hook echo was analyzed by single Doppler radar, located in northern Taiwan. The mesocyclone was embedded in a mesoscale convective rainband near northern Taiwan coast on 10 September 2004. The synoptic environment was characterized by a moderate CAPE and weak ambient vertical shear from surface to 5 km. In addition, a pronounced low-level mesoscale shear/convergence zone, which might result from the interaction of two tropical depressions, was also identified in the northwest coast of Taiwan, providing a favorable dynamic condition for the development of the mesocyclone. The mesocyclone was firstly documented by analyzing the dipole signature revealed from the single Doppler radar radial velocity data. The analysis shows that this mesocyclone formed initially at low level, then deepened and strengthened rapidly into mature stage with the vertical depth deeper than 8 km and later decayed rapidly. Correspondingly, the couplet diameter of mesocyclone decreased with the height at the time of vortexgenesis, and then evolved into columnar structure accompanied with the broader diameter in middle layer. The mesocyclone lasted for about 2 hour. The Ground-Based Velocity Track Display (GBVTD) method proposed by Lee et al. (1999) was further applied to retrieve the axisymmetric circulation of the mesocyclone. The GBVTD-derived primary circulation shows the radius of maximum wind (RMW) of the mesocyclone was about 5–6 km and varied from inward tilting to outward tilting with time. The axisymmetric radial wind field was initially characterized with a low-level outflow inside RMW and inflow outside RMW, respectively. The strongest reflectivity was associated with stronger updraft near RMW, and weak downdraft was located at the center of the cyclone. Subsequently the downdraft and reflectivity near the mesocyclone center strengthened obviously, accompanied with the low-level outflow, strong updraft as well as high reflectivity extending outside RMW. The relative tangential wind initially exhibited a wavenumber 1 asymmetric structure with the maximum wind region at the left portion of the cyclone and shifted counterclockwise with height. The axisymmetric tangential wind strengthened and reached its maximum intensity with a value about 20 m/s at $z=1$ km. After that the axisymmetric tangential wind decreased rapidly, meanwhile the wave-1 asymmetric structure redeveloped with the maximum wind at the left-front of motion. In summary, the evolution and structure of the mesocyclone is similar to that observed within a non-supercell mesocyclone. It is worth to mention that the axisymmetric circulation characteristics of the mesocyclone at its mature stage are very similar to those observed in a mature typhoon. However, there are significant differences, i. e., the size is much smaller, the life time is much shorter, and the downdraft in the center is produced by precipitation instead of compensating subsidence.

* 资助课题: 国家自然科学基金(40505004 和 40333025)项目、国家重点机理研究发展项目(973:2004CB18301)、上海台风研究基金(2006STA01-2)。

作者简介: 赵坤, 主要从事雷达气象和中尺度灾害性天气研究。E-mail: zhaokun@nju.edu.cn

Key words Doppler radar, Hook echo, Mesocyclone, GBVTD

摘要 2004年9月10日傍晚,在台湾北部海面大范围中尺度对流雨带中有一钩状回波并伴随中气旋。受台湾东北部和西南部海面两个热带低压系统的环流影响,海峡北部海面有一大尺度的风切辐合带,为中气旋发展提供了有利环境。文中利用台湾地区北部民用航空局中正机场多普勒雷达资料,分析中气旋特征,结果显示此中气旋由低层形成随后向上发展,最高可达8 km以上,内核直径先是低层大中层小,随后中层扩大与低层接近成圆柱状,之后快速减弱,整个过程约2 h。进一步用地基雷达风速轨迹显示法(GBVTD)反演中气旋成熟期间的环流结构变化,结果显示在分析期间,最大风半径维持在5—6 km,且随时间在高度分布由向内倾斜转化为无明显倾斜再到向外倾斜。轴对称径向风先在低层最大风速半径以内有外流,以外有内流,在最大风速半径处为上升运动区并伴随强回波,而在气旋中心附近为下沉运动区。随后气旋中心回波和下沉运动均逐渐增强,同时低层外流增强并扩散至最大风速半径外,相应的上升运动和强回波也移至最大风速半径外。切向风先呈现波数1的非对称结构,最大风速区位于气旋移动的左侧,且随高度有沿逆时针方向旋转的现象,随后显著增强,分布趋于对称,最大轴对称切向风达20 m/s位于约1 km高度。此后切向风速逐渐减弱,同时波数1非对称结构又有加强的趋势,最大风速区位于移动方向左前侧。中气旋发展过程和结构同其他地区观测的非超级单体微气旋非常相似,其成熟期环流特征同台风结构也非常类似,不同之处在于其中心下沉运动及低层外流为降水所造成,且尺度和生命期均远小于台风。

关键词 多普勒雷达, 钩状回波, 中气旋, 地基雷达, 风速轨迹, 显示法

中图法分类号 P458.2

1 引言

对流风暴中常常伴随中气旋(mesocyclone),强烈发展的中气旋也常常是产生龙卷的母环流。Fujita(1973)最早提出超级单体中的“龙卷气旋”,即现在广泛使用的中气旋。随着20世纪70年代多普勒天气雷达在研究中的使用,超级单体的中气旋特征被充分揭示。Donaldson等1970年首次利用多普勒雷达观测到超级单体中的中气旋,随后一系列多普勒雷达观测揭示了超级单体的中气旋特征(Borwn, 1973; Ray, 1975; Lemon, 1978; Brandes, 1978)。Lemon和Doswell(1979)综合过去的研究,提出一个超级单体风暴中气旋发展的概念模式。据此模式,中气旋起源于中层(5—8 km)并向上、下增长,其切向风特征近似兰金涡旋(Milne-Thomson, 1968),核直径小于10 km,有时伴随强龙卷,相应的回波特征包括低层的钩状回波和中层有界弱回波区(BWER)。Andra等(1994)根据美国俄克拉荷马州长期观测统计,按照气旋的旋转速度、速度切变、维持时间和伸展厚度对中气旋进行了严格定义(旋转速度大于一规定值且垂直厚度大于等于3 km,持续时间至少15 min),至今仍被广泛使用。最近Wakimoto等(1998)和Ziegler等(2001)利用飞机雷达观测分析两个超级单体后发现,超级单体发展初期,中、低层分别存在独立的中气旋并伴随上升运动,随后两气旋逐渐合并成一强中气旋并伴随下沉运动。

一系列数值模拟(Weisman, 1982, 1984; Davies-Jones, 1993)和理论研究(Rotunno, 1985; Brook, 1994)显示超级单体风暴内中、低层的中气旋生成机制并不相同。中层中气旋是环境垂直风切变形成的水平涡管,经对流上升运动的倾斜作用而造成。低层中气旋则起源于蒸发冷却下沉气流与暖湿入流边界的斜压涡度,或者在超级单体附近预先存在的冷热气团边界。一些数值模拟研究显示低层中气旋和龙卷的关系更紧密(Brook, 1994)。

除超级单体外,观测研究也发现一些小尺度气旋常在非超级单体风暴内发展,并常发展至中气旋的强度。Wakimoto等(1989)最早提出非超级单体内微气旋(Misocyclone)发展的概念模式,指出这类气旋倾向于沿着中尺度边界层发展,如辐合线、切变带等,主要通过积云的上升运动对环境垂直涡度拉升产生。最近的一些观测揭示中气旋常在线状对流系统(如飑线)的前缘低层产生(DeWald, 1998; Funk, 1999; Trapp, 1999; Atkins, 2004)。Trapp和Weisman等(2003)利用三维数值云模式探讨了线状对流前缘低层涡旋形成的机制和结构,结果显示,低层涡旋主要透过下沉气流对水平涡度的倾斜效应形成,随后由辐合引起的行星涡度垂直拉升使涡旋加强。同超级单体中的中气旋相比,这种涡旋没有中层持续的旋升气流和强的垂直动力强迫。

国外的研究无论是观测和数值模拟对于对流风暴中的中气旋的结构特征已有相当的进展。中国对

于对流风暴内的中气旋和小尺度涡旋也有一些研究(郑媛媛, 2004; 朱君鉴, 2004; 周海光, 2005; 刘淑媛, 2007),但由于观测资料的缺乏和雷达分辨率的限制,这方面的研究相当有限,对中气旋的结构特征研究也相当罕见。2004年9月10日,在台湾海峡上观测到一中尺度对流系统内嵌有钩状回波并伴随中气旋。由于其距离台湾北部民航局(CKS)雷达仅60 km左右,且CKS雷达径向分辨率高达200 m,因此提供绝佳机会了解气旋发展期间的中尺度结构特征。本文针对该个例,利用CKS雷达观测数据,对中气旋的环流特征和回波结构进行中尺度分析。同以前研究不同的是,该中气旋发生在副热带洋面上的中尺度对流系统内,发生的环境特征

为两个热带低压环流引起的风切变辐合带。

2 资料来源和分析方法

2.1 资料来源

本文资料为台湾民航局CKS多普勒雷达(C波段;径向分辨率200 m;最大不模糊速度19.875 m/s)每15 min一次降水回波场和径向风场;美国国家环境预报中心(NCEP)高分辨率的FNL(Final Analyses)资料;台北和马公测站每12 h的探空图及地面观测站小时数据;美国GEOS9卫星每小时红外、水汽和可见光数据。图1a显示雷达和地面站的位置分布,图1b显示3 km高度中气旋移动路径以及其成熟期对应的雷达回波,其中气旋中心定位采用

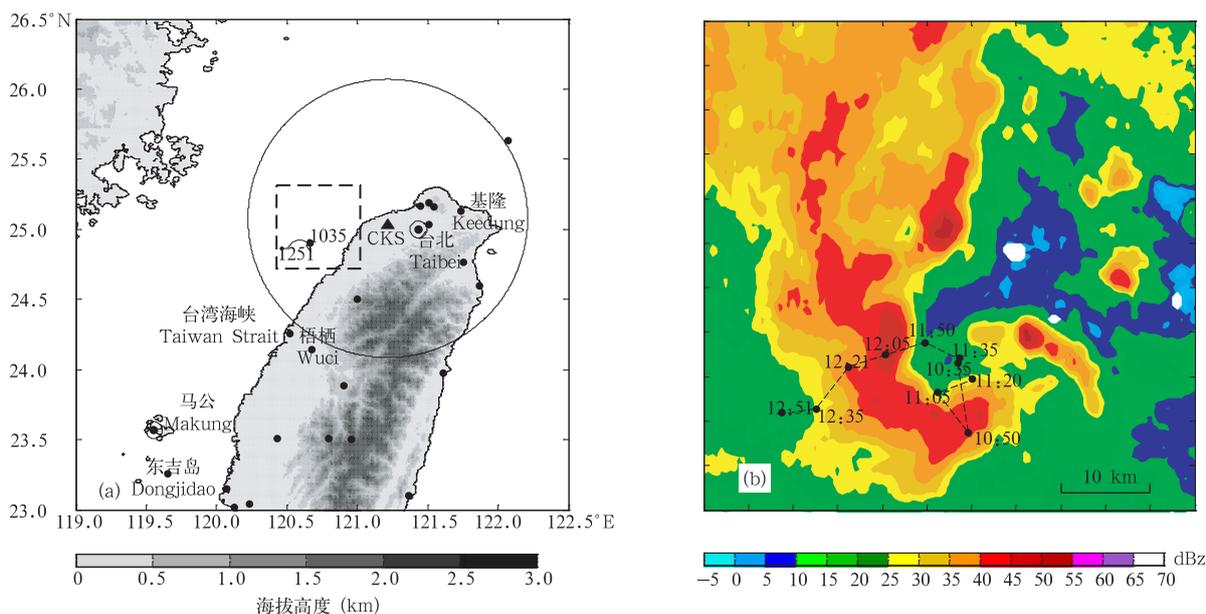


图1 CKS雷达探测区域(a)和中气旋位置(b)

(图 a 中虚线框为 11:20 UTC CKS 雷达 3 km 高度反射率因子、气旋中心位置和移动路径)

Fig. 1 (a) Locations of CKS radar, surface stations and rawinsonde sites; (b) Reflectivity from CKS radar at 3 km at 11:20 UTC (The black line in (a) and (b) indicates the track of the mesocyclone at 3 km)

Lee 等(2000)提出的 GBVTD-Simplex 方法。

2.2 分析方法

利用美国国家大气研究中心(NCAR)提供的SOLOII软件对雷达资料进行预处理,包括去除噪声点、地物回波、二次回波和多普勒速度折叠。为了使部分环流场不因雷达资料的缺失而失去完整性,本研究采用二维线性最小二乘法,针对多普勒风场进行资料补充。资料预处理后,利用双线性内插将雷达资料从极坐标插值到笛卡儿坐标下。

中气旋在多普勒天气雷达速度图上的典型标志是一对距离近、符号相反的速度偶。假设中气旋满足兰金涡旋条件(Brown, et al, 1983),气旋的旋转速度可采用以下式子来估计

$$V_d = \frac{|V_{rmax}| + |V_{rmin}|}{2} \quad (1)$$

其中, V_d 代表气旋的旋转速度, V_{rmax} 代表最大出流速度, V_{rmin} 代表最大入流速度。而气旋的核区直径则由最大入流速度和最大出流速度间的距离确定。

环流反演利用周仲岛等(1994)及 Lee 等(1999)提出的 GBVTD(Ground Based Velocity Track Display)方法,其中气旋中心定位方法采用 GBVTD-Simplex 方法(Lee, et al, 2000)。处理程序上,在中心位置确定后,以气旋中心为轴心将数据放置于个别半径上进行反演分析。设定分析半径为 0.5—10 km,分辨率为 0.5 km,共 20 圈,分析高度 1—6 km,分辨率 1 km,共 6 层。逼近曲线取 90 个数据点进行,当连续数据点少于 45 点时,非轴对称分量均不予分析;数据点少于 30 点时,所有风场分量均不分析,相关处理程序可参阅周仲岛等(1994)的文章。GBVTD 反演得到轴对称环流后,可进一步按照 Lee 等(1999)的方法计

算轴对称垂直速度。公式如下

$$\bar{w} = -\frac{1}{\rho} \int_{z=0}^{z=H} \rho \left(\frac{\partial \bar{V}_R}{\partial r} + \frac{\bar{V}_R}{r} \right) dz \quad (2)$$

其中 \bar{V}_R 为轴对称径向风, \bar{w} 为轴对称垂直速度, ρ 为空气密度,可由探空资料计算。

3 天气背景

2004 年 9 月 10 日台湾地区每小时卫星红外云图显示,06:00 UTC 在台湾的东北部近海和西南海面上各有一明显的中尺度云团,两云团结构紧密、对流发展深厚,其中西南部云团几乎覆盖了整个台湾海峡(图 2a)。06:00—10:00 UTC,北部云团向西

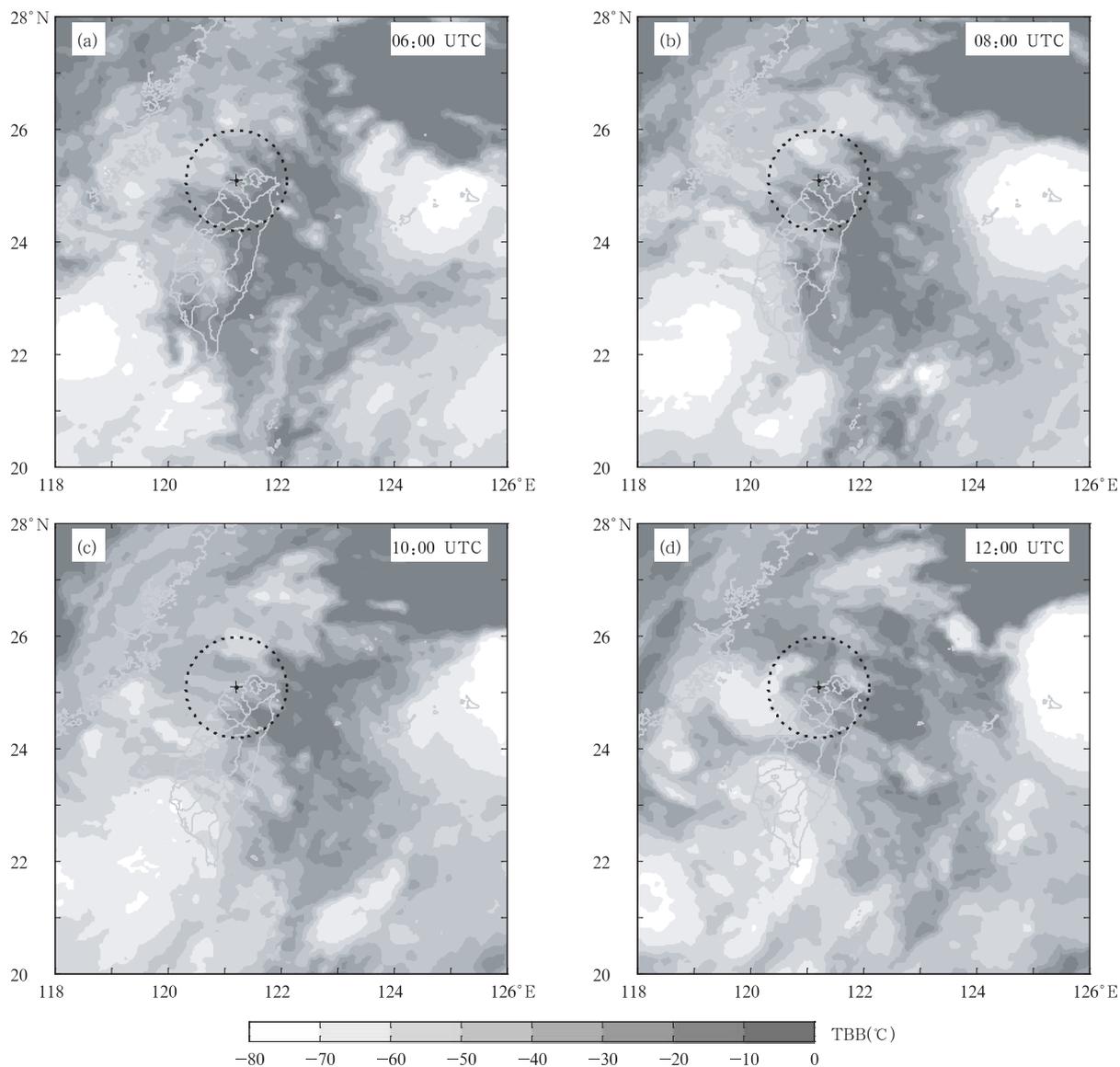


图 2 2004 年 9 月 10 日 00:06—12:00 UTC GEOS9 红外 1 云图 (+ 表示 CKS 雷达所在位置,距离圈半径为 100 km)

Fig. 2 Times series of the infrared images from GEOS9 from 06:00 to 12:00 UTC 10 September 2004

(+ denotes the position of CKS radar, and the radius of range circle is 100 km)

北方向移动并不断增强,而南部云团则向东运动(图 2b)。在 10:00 UTC,台湾海峡中北部(CKS 雷达西南部海面上)有一新生对流,对流的激发很可能是东北气流和东南气流的辐合产生(图 2c)。此后该新生对流不断增强,并在 12:00 UTC 发展成一有相当有组织的云系(图 2d),其温度小于 -60°C 的面积也相当广。2004 年 9 月 10 日 06:00 UTC 地面天气图(图 3a)和 700 hPa 天气图(图 3b)显示,在台湾东北部近海面上和西南部海面上分别存在一个热带低压。台湾处于这两个低压所形成的东北—西南方向延伸的低压带上,值得注意的是这两个低压都相当浅薄。受东北部热带低压影响,台湾西北部沿岸大多吹东北风,与西南部低压伴随的东南风在台湾的中部到台湾海峡形成一条显著的东西走向的风切变带。美国 QuickScat 卫星上的海面风资料也证实该风切变带存在(图略)。

2004 年 9 月 10 日 00:00 UTC(气旋发生前 10 h)台湾海峡上马公探空站的斜温图(图 4)显示,1000 hPa 以下为弱东南风,1000 到 200 hPa 则以西南风为主,环境的垂直风切变为中等偏弱,0—5 km

风切变约为 12 m/s,风向随高度顺转,有显著的暖平流,CAPE 值为 $1613.6\text{ m}^2/\text{s}^2$,抬升凝结高度(LCL)和自由对流高度(LFC)分别为 213 m 和 381 m,表明当时环境为中度风切变不稳定(Trapp, 2003)。经过计算,体积理查逊数(Bulk Richardson number)为 98,显示当时环境大气为有利于多单体风暴成长环境(Weisman, 1984)。考虑到 00:00 UTC 的探空可能距离气旋发生的时间比较长,我们也对 12:00 UTC(气旋发生后)探空进行分析,结果显示 0—5 km 风切变约为 10 m/s,CAPE 为 $1496.3\text{ m}^2/\text{s}^2$,由此可以推断在气旋发展期间,环境为中度风切变不稳定。为了进一步了解台湾海峡附近的环境条件,我们沿台湾西海岸从北向南选了基隆、梧栖和东吉岛 3 个测站(图 1),对这些测站每小时的气象观测要素进行分析。在 10:00 UTC 基隆站,风向已由东北风转为西北风,风速约 3 m/s,温度和露点分别为 26°C 、 24°C ;梧栖站风向由西南偏西风转为静风,温度和露点分别为 28°C 、 23°C ;东吉岛风向仍为持续的西南风,风速为 9 m/s,温度露点分别为 26°C 、 24°C (图略)。这 3 个测站的观测表明,台湾

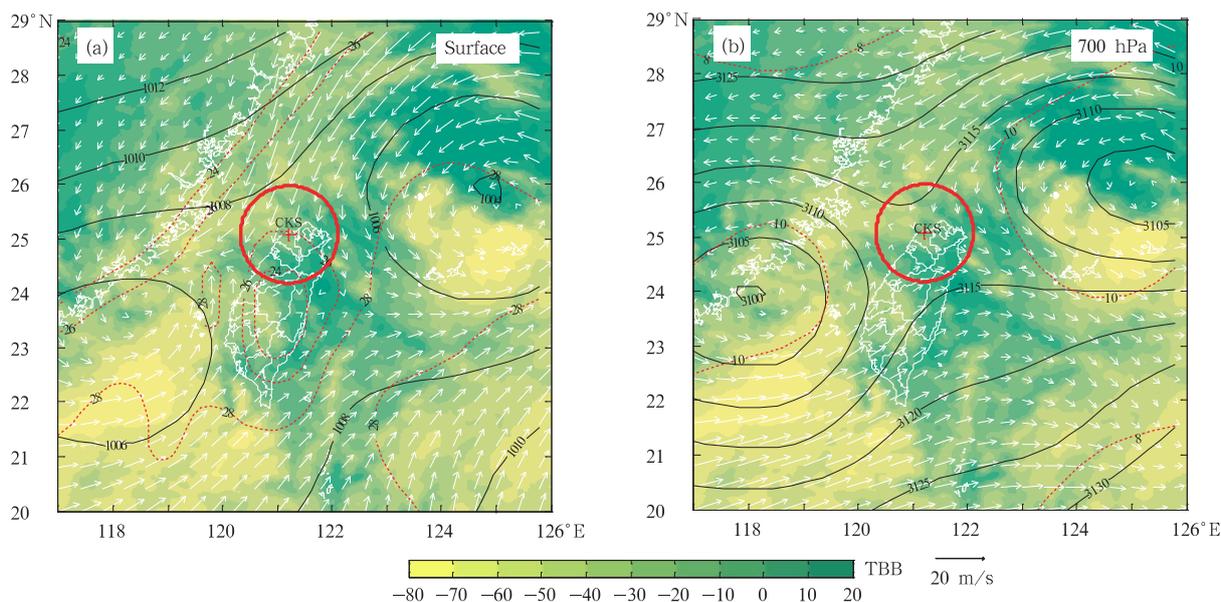


图 3 2004 年 9 月 10 日 06:00 UTC 的 FNL 地面(a)和 700 hPa(b)高空分析
(黑色实线为位势高度,虚线为温度,背景颜色表示 GEOS9 红外一亮温)

Fig. 3 (a) The surface and (b) 700 hPa upper-air analysis from FNL model at 06:00 UTC 10 September 2004
(The infrared image from GEOS9 is also plotted with color-shadings in (a) and (b). The black solid line denotes geopotential height (gpm), and the dash line temperature($^{\circ}\text{C}$). + denotes the position of CKS radar, and the radius of range circle is 100 km)

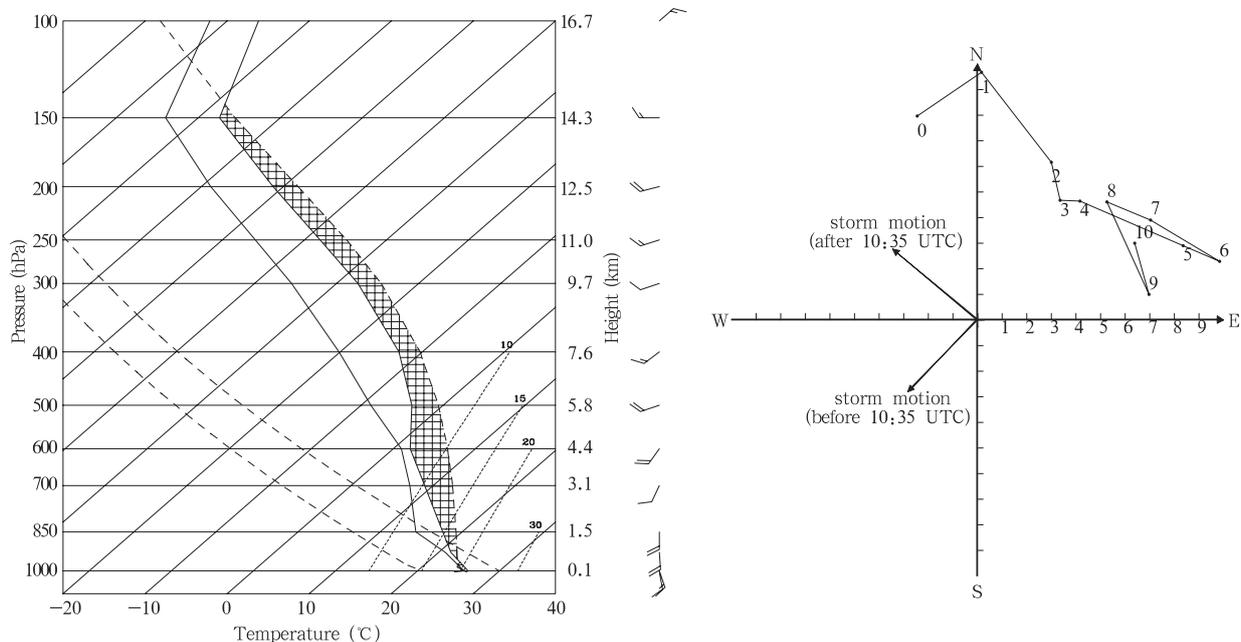


图4 2004年9月10日00:00 UTC马公站探空斜温图(a)和风径图(b)

(图b中箭头代表11:35 UTC前后风暴系统移动方向)

Fig. 4 (a) Sounding and (b) hodograph from Makung station at 00:00 UTC on 10 September 2004

(Winds are in meters per second (half barb=2.5 m/s; full barb=5 m/s). The arrows represent the storm motion before and after 10:35 UTC)

西岸的北部和南部分别受南北两个低压系统所控制,吹持续的偏北风和西南风,而两低压交界处位于台湾中部和北部之间,这同天气图的分析也相当一致。此外,在台湾北部和南部低层空气都比较潮湿,而中部的空气则相对比较干燥。

4 多普勒雷达资料分析

4.1 雷达回波随时间的演变特征

2004年9月09:07 UTC,在台湾西北海面上大范围降水区中有多个对流单体生成,此后这些单体不断加强发展成一片尺度约为80 km东北—西南走向的中尺度对流系统(图略)。10:05 UTC,对流系统向西南以5 m/s左右的速度移动。在系统移动的前沿和左后侧有两个发展比较旺盛的对流单体 C_1 和 C_2 ,其中对流单体 C_2 强度较强(图5a)。10:20 UTC(图5b),对流单体 C_2 强度继续增强,在对流单体 C_1 移动的左前侧出现突出物。由垂直剖面A—A'(图6a)显示对流系统呈现多单体风暴的结构,其中对流单体 C_2 超过50 dBz回波从地面伸展至5 km,而对流单体 C_1 最强回波50 dBz出现在约3 km,表明对流单体 C_1 和 C_2 分别处于不同的发展阶段。10:35 UTC(图5c),对流单体 C_1 强度减

弱,而 C_2 持续增强达到最强阶段,同时在对流单体 C_1 和 C_2 之间有一新的对流单体 C_3 发展,低层($< 3.8^\circ$)风暴相对径向速度出现微弱的气旋式环流特征。10:50 UTC(图5d),对流单体 C_2 开始减弱,而对流单体 C_1 和 C_3 随时间增强。11:05 UTC(图5e)对流单体 C_3 与 C_1 合并,使 C_1 进一步加强并且在 C_1 前进的右后侧出现突出物(此时系统移动方向以由先前的西南逐渐逆时针转为西北方向),速度图上的气旋环流特征更加明显,尺度约7 km,满足Andra(1994)定义的中气旋标准。11:20 UTC(图5f),对流单体 C_1 低层呈现中纬度观测的典型超级单体钩状回波(Hook Echo)结构(Chisholm, et al, 1973)。速度图显示中气旋已经显著加强,尺度超过10 km,并发展至中高层(8 km)。但是回波图上并未观测到典型超级单体中高层由悬垂回波所包围的有界弱回波区(Bounded Weak Echo Region, BWER)(图8)。由11:20 UTC沿系统移动方向(B—B')穿过最强回波位置的反射率因子垂直剖面图显示,强回波有向移动方向倾斜的特征(图6b),而由垂直系统移动方向(C—C')剖面则显示出典型的回波悬垂、弱回波区左侧的回波墙(图6c)。

Lemon(1977)提出对流单体风暴发展的3个阶

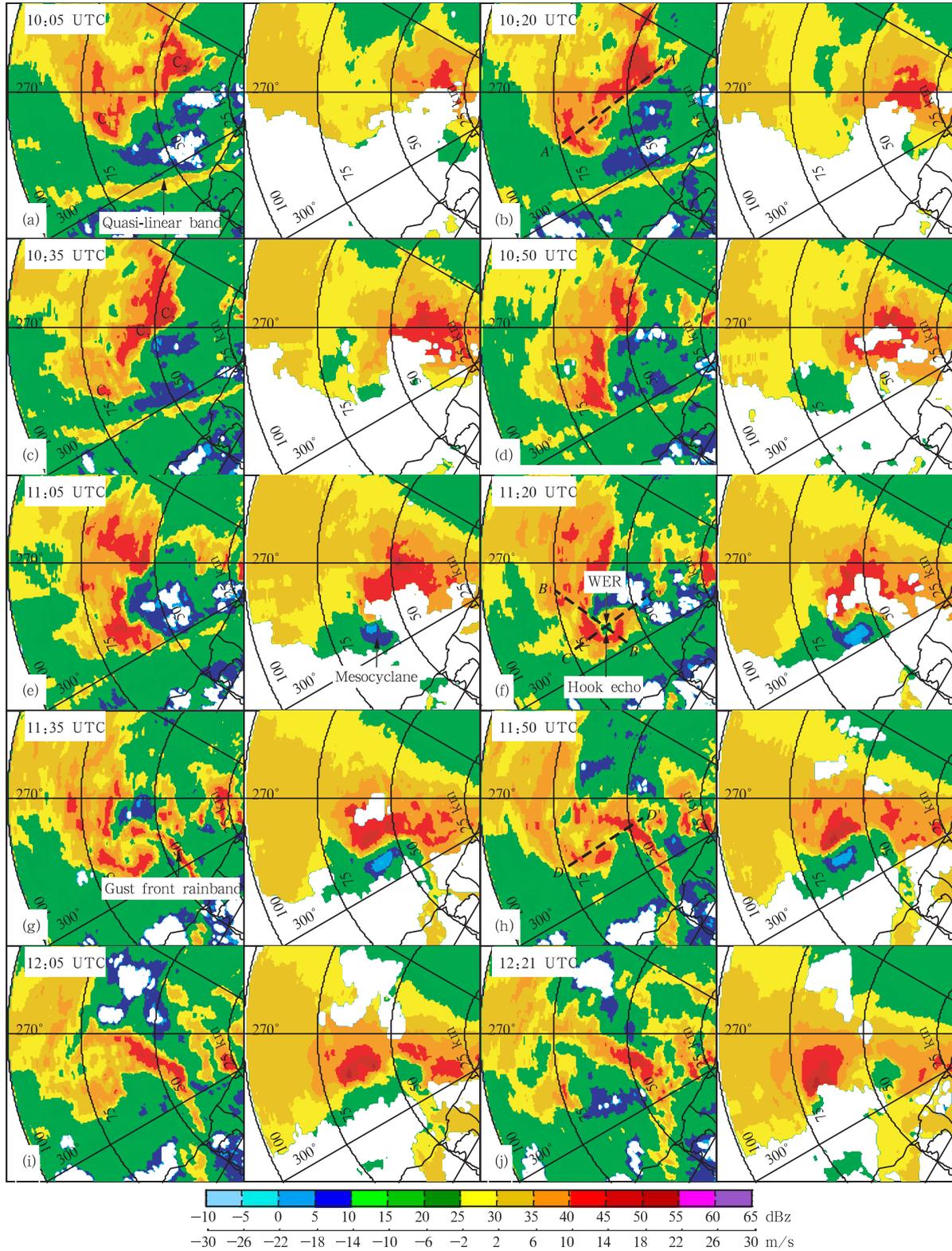


图5 2004年9月10日10:05—12:21 UTC CKS雷达0.3°仰角反射率因子和风暴相对径向速度演变
 (a. 10:05 UTC, b. 10:20 UTC, c. 10:35 UTC, d. 10:50 UTC, e. 11:05 UTC, f. 11:20 UTC, g. 11:35 UTC,
 h. 11:50 UTC, i. 12:05 UTC, j. 12:21 UTC)

Fig. 5 The evolution of the reflectivity and storm relative radial velocity from CKS radar on 0.3° elevation
 (The times are (a)10:05, (b)10:20, (c)10:35, (d)10:50, (e)11:05, (f)11:20, (g)11:35, (h) 11:50,
 (i)12:05 and (j)12:21 UTC on 10 Sep 2004 respectively)

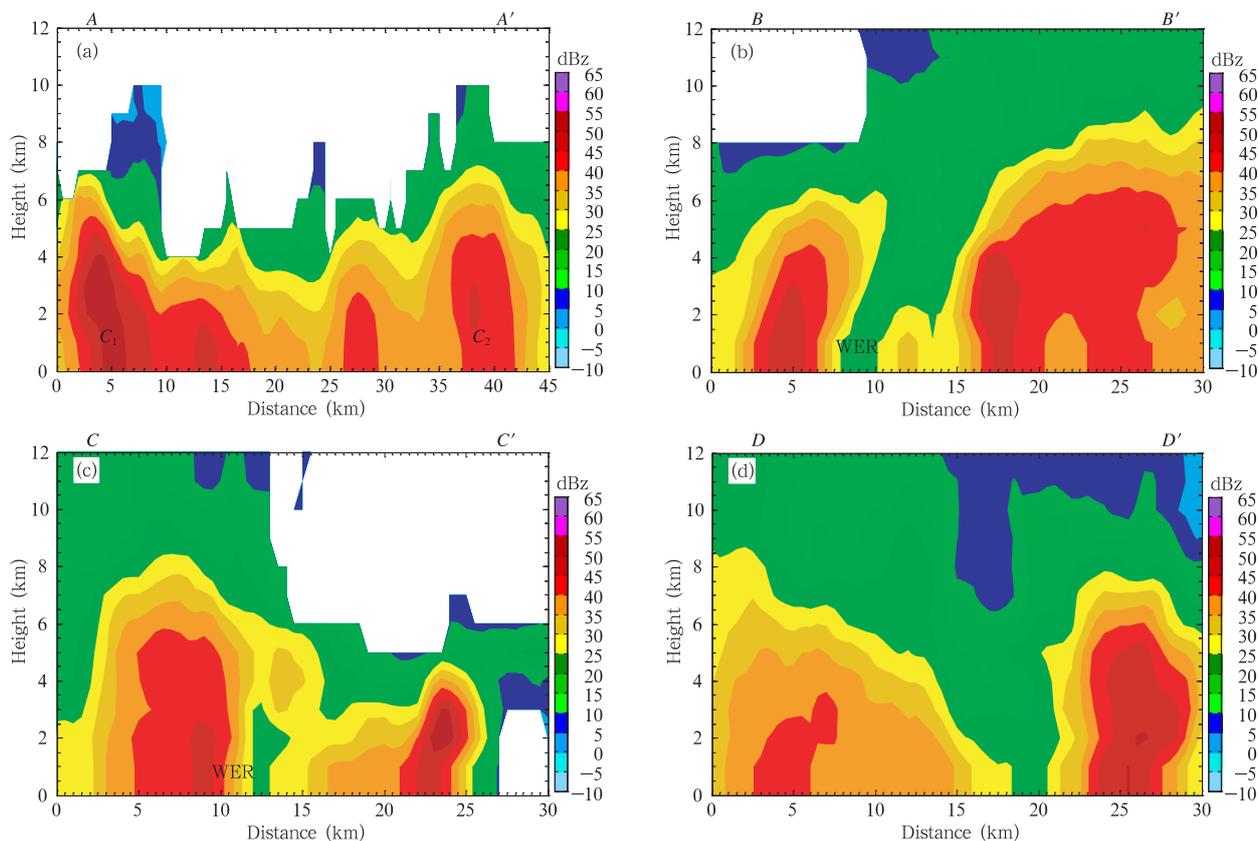


图6 2004年9月10日10:05—12:21 UTC通过对流系统的反射率因子垂直剖面的时间演变
(a. 10:20 UTC, b—c. 11:20 UTC, d. 11:50 UTC, 剖面位置分别对应图5中虚线A—A'、B—B'、C—C'和D—D')

Fig. 6 The vertical cross sections of reflectivity along (a) A—A', (b) B—B', (c) C—C' and (d) D—D' in Fig. 5.

(The times are at (a) 10:20, (b—c) 11:20, (d) 11:50 UTC on 10 Sep 2004 respectively)

段的回波模型,其中超级单体对应的回波包括低层的钩状回波、中低层的有界回波和高层的悬垂回波。依据该模型,单体 C_1 高层的回波特征同经典的超级单体并不相符。另一点值得注意的是,此时在钩状回波的东侧有一新的线状雨带开始生成(图5f和图6c),此雨带可能由于降水形成的对流中尺度下沉气流,在其前缘形成阵风锋面与环境风场辐合所造成(Lemon, 1979)。11:20—11:50 UTC(图5f—h),对流单体 C_1 和相应的钩状回波强度都明显减弱,弱回波区逐渐被填满,钩状回波东侧新生雨带则发展至最强,45 dBZ回波高度达到5 km左右(图6d)。速度图显示中气旋在该阶段强度变化不大。11:50—12:21 UTC(图5i,5j),对流单体 C_1 向西移动和新生雨带分离,伴随的钩状回波特征和中气旋特征逐渐消失。至12:51 UTC(图略),对流单体 C_1 及伴随的中气旋特征基本消失。

4.2 中气旋的特征分析

如上述分析,对流单体 C_1 伴随的中气旋于2004年9月10日10:35 UTC—12:51 UTC被CKS雷达观测到,其持续时间长达2 h,达到超级单体风暴中的中层涡旋持续的时间尺度(平均约90 min, Burgess, 1982)。由前面的天气分析可知,中气旋发生在两个热带低压引起的风切变辐合线附近,因此低层环境为气旋的发展提供了相当的正涡度,这可能是该中气旋能够长时间维持的一个原因。为进一步分析该中气旋发展期间强度和尺度随时间的变化,利用CKS雷达的资料和式(1)估计10:35—12:51 UTC气旋的旋转速度和核半径(图7)。图7显示,在10:35 UTC气旋首先在低层发展,相应的径向速度图上为弱的气旋式辐合区(图5c)。值得注意的是,在气旋发展初期甚至更早并没有观测到中层涡旋的存在,表明其并非从中层向下发展,

这同典型超级单体中气旋通常在高层形成并向下发展的情形明显不同(Lemon, 1979)。在 10:35—11:20 UTC,伴随着对流加强(图 5c—5e),气旋低层的旋转速度快速增强,并向上发展,高度达到 8 km 以上,而内核直径是下面大上面小,呈喇叭形,最大旋转速度在 2 km 以下,约 21 m/s,相应的核半径约为 11 km,按照美国国家天气局中气旋的判据,属于强中气旋(Andra, 1994)。

由 11:20 UTC 不同仰角径向速度显示(图 8),在 0.3°和 1°仰角径向速度特征基本为辐合式气旋旋转,2.5°和 3.8°仰角为纯粹的气旋式旋转,6°仰角为气旋式辐散,7°仰角近似纯粹辐散,基本符合成熟中气旋的概念模型。对应的反射率因子图显示 3.8°以下(图 8)呈现明显的钩状回波,最强回波位于钩状回波西侧,6°仰角以上回波强度显著减弱,范围没

有明显变化,另外在低层钩状回波上也未出现有界弱回波区。过去 Fujita 的研究(Fujita, 1958a)指出钩状回波的形成是由于中尺度旋转伴随的旋转上升流产生的平流作用重新分布降水所至,该过程同此处钩状回波形成相当一致。11:20—11:50 UTC(图 7),中气旋继续向上发展,内核直径中层扩大与低层接近圆柱状,旋转速度仍然维持中层小低层大。但 2 km 以上旋转速度明显增加,最大旋转速度仍维持在 2 km 以下,约为 20 m/s,核直径缩小到 7.6 km。11:50—12:51 UTC(图 7),气旋进入消散阶段,气旋高度降低至 4 km。但结构仍然维持圆柱状,中层到低层旋转速度均明显降低,且大小比较接近约为 13 m/s,内核直径扩大约为 15 km,而相应的核半径为 15 km 左右。

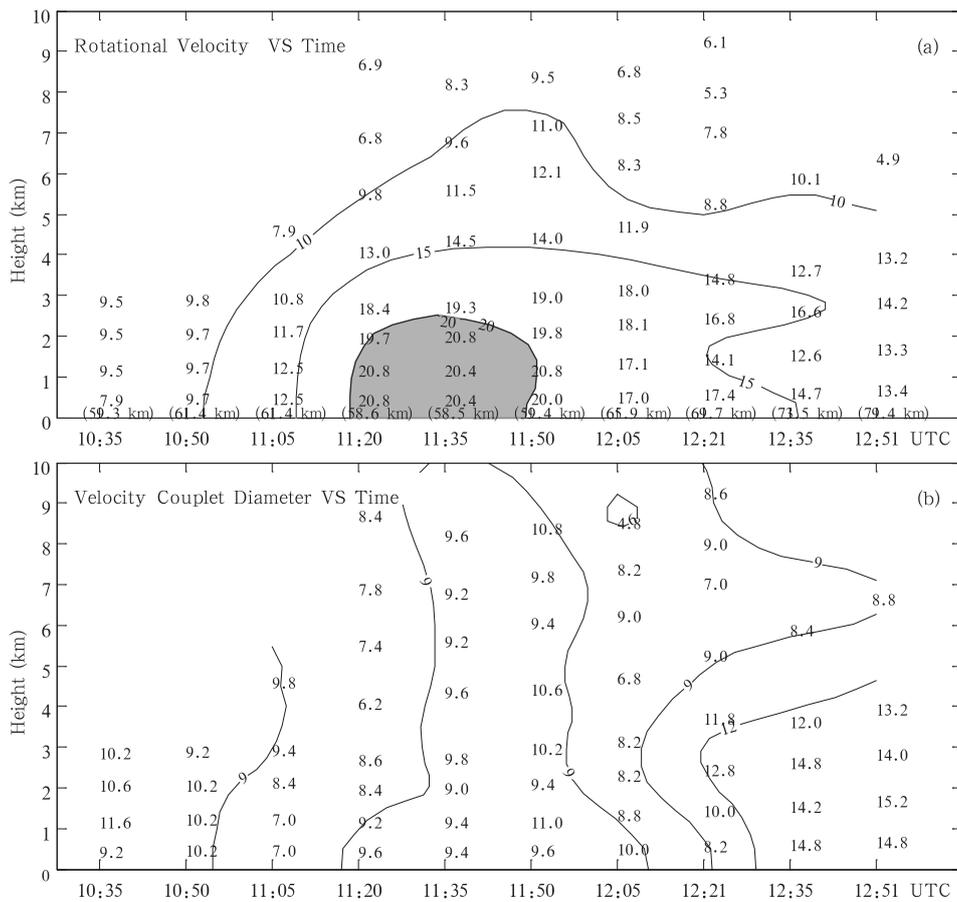


图 7 2004 年 9 月 10 日 10:35—12:51 UTC 每 15 min 气旋的(a)旋转速度和 (b)核直径随时间和高度的变化

(图 a 中扩号内的数字表示最低层涡旋中心离雷达的距离,阴影表示旋转速度大于 20 m/s 的区域)

Fig. 7 Time-height profiles of mesocyclone (a) rotational velocity and (b) couplet diameter (The rotational velocity values are contoured every 5 m/s, with value greater than 20 m/s shaded gray)

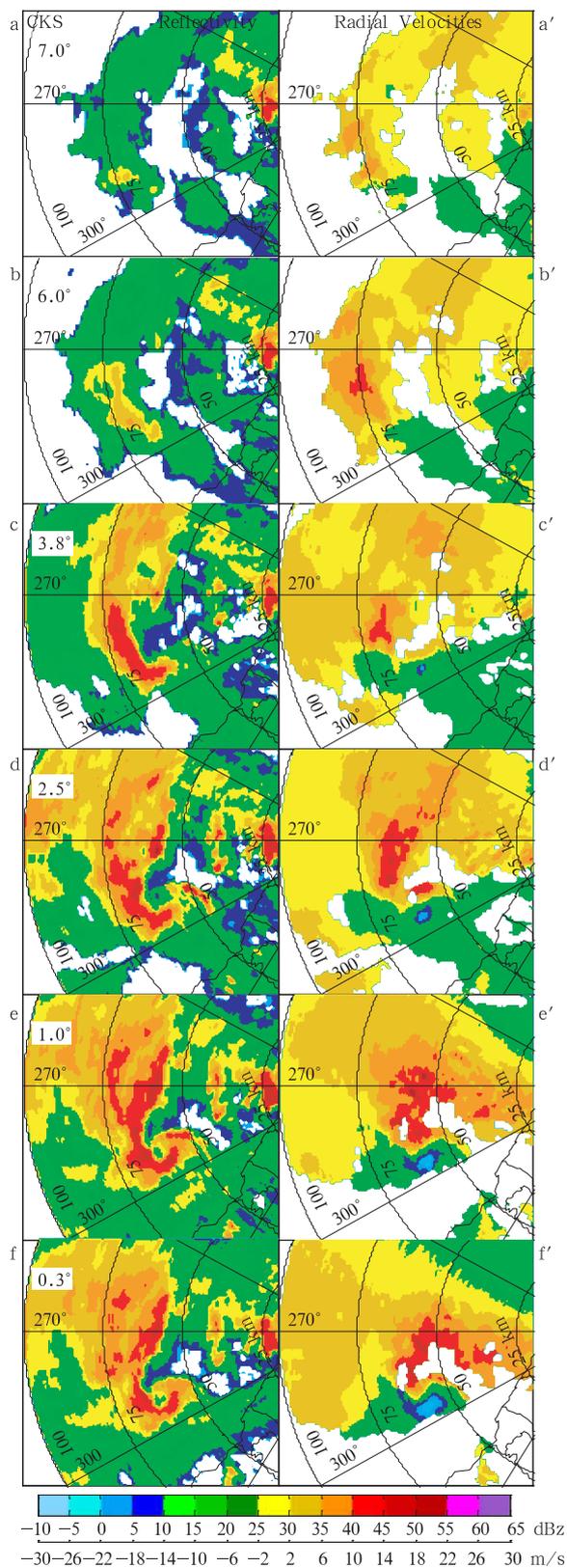


图8 2004年9月10日11:20 UTC,CKS雷达不同仰角(a—f)的反射率和风暴相对径向速度(a'—f')
 Fig.8 Radar reflectivity and storm-relative radial velocities on 0.3°, 1.0°, 2.5°, 3.8°, 6.0°, and 7.0° elevations at 11:20 UTC on 10 September 2004

4.3 中气旋环流结构

为进一步分析2004年9月10日的中气旋环流结构,利用GBVTD方法分析气旋成熟期(11:20、11:35和11:50 UTC 3个时刻)的中低层环流结构变化。

4.3.1 轴对称环流结构

图9a为11:20 UTC轴对称切向速度垂直剖面图(图中坐标原点为气旋中心)。图中显示此时1—2 km最大轴对称切向风约18 m/s,所在位置离气旋中心约5 km,并且最大风速半径随高度有往内倾斜的现象。在高度2—6 km的倾斜角约30°,同时最大风速半径与平均最大回波半径也相当一致。相应时间的轴对称径向速度和垂直速度分量剖面显示(图9b),在3 km以下,最大风速半径以内为外流,以外为内流;而在3 km以上最大风速半径内外均为内流。同时,在最大风速半径处高度2 km有一最大上升运动区,而在最大风速半径以内3 km高度以下为下沉运动。这种低层最大风速半径之内为外流,之外为内流以及最大风速半径处的强上升运动,同过去分析的成熟台风低层径向风结构类似(周仲岛,1994; Marks, 1987)。然而进一步配合水平回波图(图5f)分析发现,此时气旋中心已经为降水所填塞,且有一阵风锋雨带位于最大风速半径处。由此推测,此处最大风速半径内低层外流为气旋中心降水形成的对流尺度下沉气流向外扩散所引起,并在最大风速半径处形成阵风锋面与环境风场辐合,并激发出新的对流,这同台风内的外流形成机制显著不同。

11:35 UTC(图9c),轴对称切向风明显增强,1—2 km最大切向风达到20 m/s,所在半径约为5 km。同时中层最大风速半径扩大至与低层几乎一致,最大风半径随高度已无明显倾斜。气旋中心附近的平均回波强度显著增强,同时在最大风速半径外7 km左右存在另外平均回波极值中心。径向速度方面(图9d),低层的外流显著加强并扩散到最大风速半径以外即距离气旋中心7 km左右的位置,在此以外仍然为内流。而垂直速度则显示,此时最大上升运动位于离气旋中心7 km左右2 km高度的位置,同低层内外流辐合的位置相当一致,对应的平均回波图也显示该最大上升运动对应回波极大值区。这一最大风速半径外低层的内外流辐合区同强上升运动及强回波的配置显示,气旋中心降水加强

进一步增强外流,使阵风锋面移至最大风速半径外。

11:50 UTC,轴对称切向风逐渐减弱,1—2 km 最大轴对称切向风约 18 m/s。此时中层最大风速半径明显扩大,最大风速半径有随高度往外倾斜的现象,倾斜角约 30°左右(图 9e)。气旋中心的平均降水回波持续增强,最大回波超过 40 dBz,位于 1 km

高度左右。同时最大风速半径内从低层到高层均为下沉气流和强的径向风外流所控制,而径向风内流明显减弱,高度降低到 1 km 以下。这一气旋中心为降水填塞并逐渐减弱的现象,同过去观测的非超级单体微气旋在减弱期的特征非常类似(DeWald, 1998)。

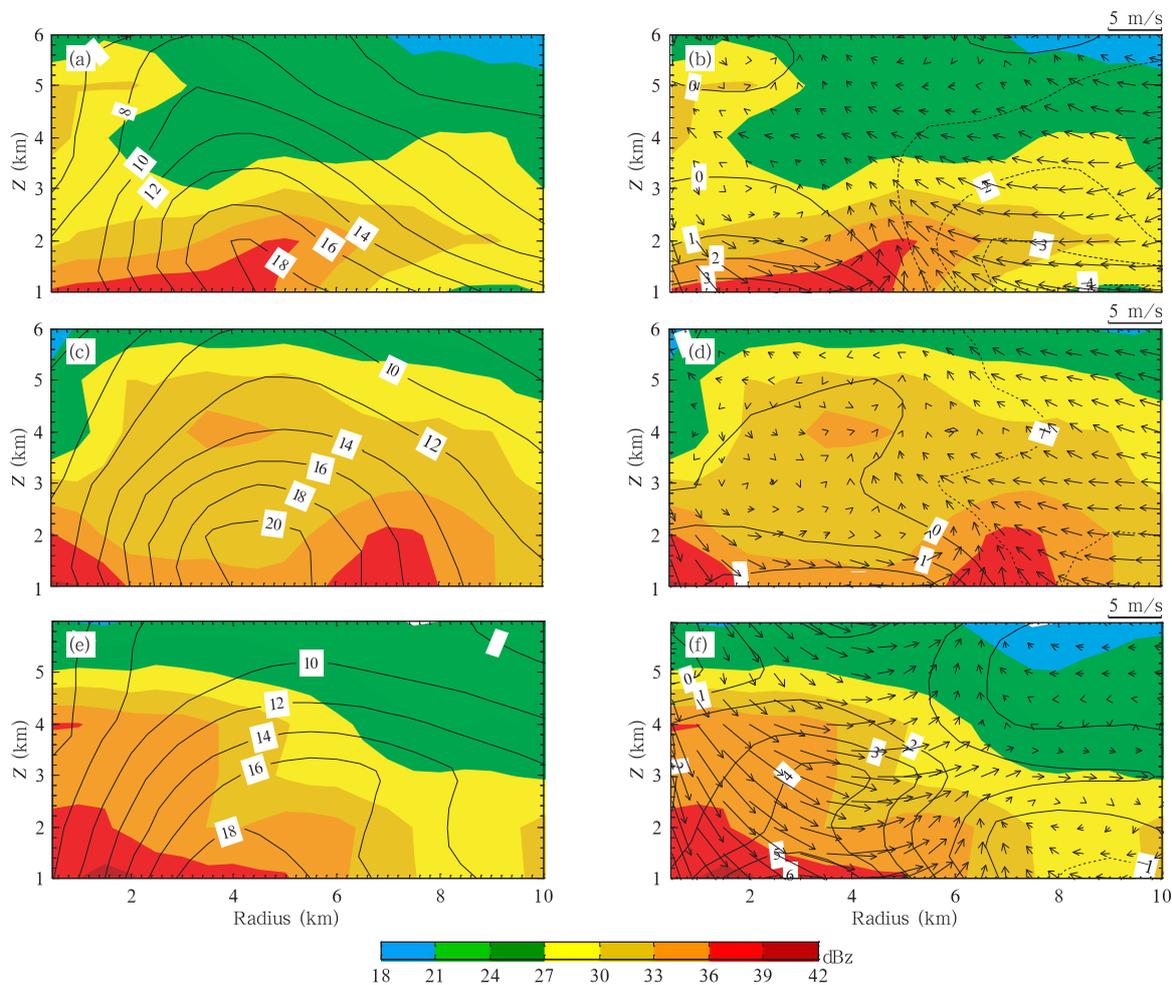


图 9 2004 年 9 月 10 日 11:20—11:50 UTC GBVTD 反演的中气旋轴对称结构垂直剖面 ((a)、(c)、(e)分别为 11:20 UTC、11:35 UTC 和 11:50 UTC 的轴对称切向风;(b)、(d)、(f)分别为 11:20 UTC、11:35 UTC 和 11:50 UTC 的轴对称径向风和垂直速度;背景颜色表示平均回波)

Fig. 9 The axisymmetric structure (radius-height) of the mesocyclone at (a—b) 11:20, (c—d) 11:35 and (e—f) 11:50 UTC on 10 Sep 2004 respectively. The (a), (c) and (e) represent tangential wind; (b), (d) and (f) represent radial wind and vertical velocity (The reflectivity is in color shades)

4.3.2 非轴对称切向环流

图 10 是 11:20—11:50 UTC 中气旋在 1、3 和 5 km 的非轴对称切向环流。在 11:20 UTC(图 10a), 1 至 5 km 切向风呈现波数 1 为主的非对称结构,最大风速区位于 1 km 高度气旋移动的左侧,同强回

波区所在位置相当一致,最强风速超过 20 m/s。在 1 km 以上最大风速区随高度增加沿逆时针方向旋转,在 3 至 5 km 位于气旋移动方向的后侧。最近 Wakimoto(1998)在一次超级单体观测中也注意到钩状回波处的低层急流,其形成原因可能同超级单

体内的后侧下沉气流有关。然而由于没有完整的三维风分析,对此处钩状回波附近低层急流形成机制并不清楚。11:35 UTC(图 10b),1—5 km 切向风仍然呈现波数 1 的结构,但 3 km 以下切向风非轴对称分量明显减弱,轴对称切向分量明显增强。1

km 处切向风最大风速区顺转到气旋移动的前方,最大风速值超过 20 m/s。5 km 最大风位于气旋移动的左侧。11:50 UTC(图 10c),切向风波数 1 的非对称结构又有加强的趋势,1—5 km 最大风速区均位于移动方向左前侧,但切向风速已明显减弱。

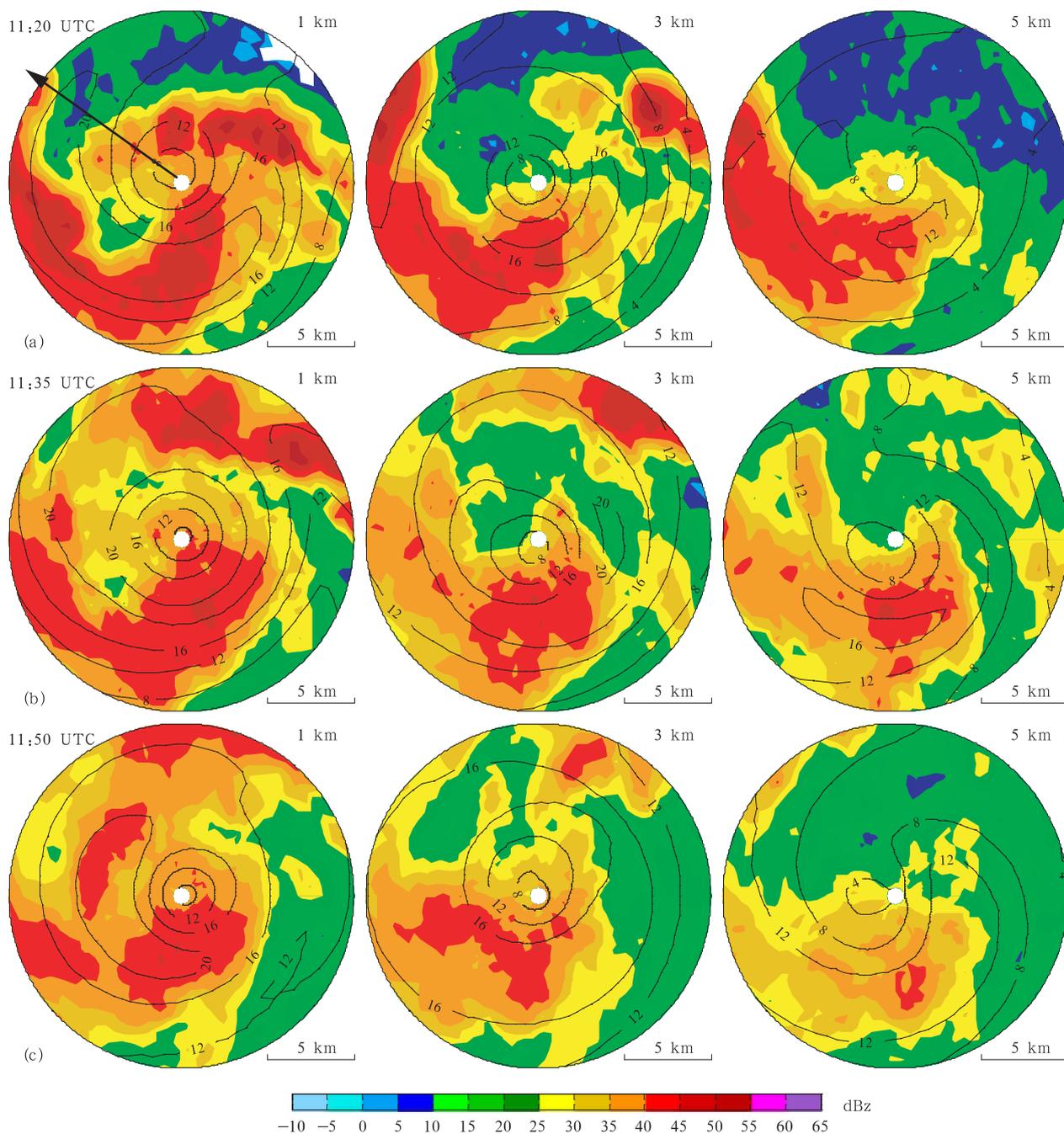


图 10 2004 年 9 月 10 日 11:20(a)、11:35(b)和 11:50 UTC(c)中气旋在 1 km、3 km 和 5 km 高度的切向速度(等值线)和反射率因子(颜色)(图(a)中箭头表示风暴移动方向)
Fig. 10 The GBVTD-derived tangential winds of mesocyclone at (a) 11:20, (b) 11:35 and (c) 11:50 UTC on 10 Sep 2004 respectively (The black arrow in (a) represents the storm motion)

5 结论和讨论

2004年9月10日傍晚,在台湾北部海面大范围中尺度对流雨带中有一钩状回波并伴随中气旋。综观分析显示,环境为中等风切变不稳定(气旋发生前后0—5 km风切变分别为12 m/s和10 m/s,CAPE值分别为 $1613.6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 和 $1496.3 \text{ m}^2/\text{s}^2$),有利于非超级单体风暴生成,同时受台湾东北部和西南部海面两个热带低压系统的环流影响,海峡北部海面有一大尺度的风切变辐合带,为中气旋发展提供了有利环境。

本文利用台湾北部民用航空局中正机场多普勒雷达资料,针对该中气旋的特征进行分析,并利用GBVTD方法分析气旋在成熟期3个连续时间(11:20 UTC、11:35 UTC、11:50 UTC)中尺度环流结构特征变化。由对偶多普勒风场估计的气旋旋转速度场和气旋内核直径大小演变过程发现,此气旋先由低层形成随后往上发展,最高超过8 km,内核直径先是低层大,中层小,之后中层扩大与低层接近成圆柱状,之后快速减弱,整个过程约2 h。GBVTD反演的气旋成熟期环流结构显示,在分析期间,最大风半径维持在5—6 km,且随时间在高度分布上由向内倾斜,转化为无明显倾斜,再到向外倾斜。轴对称径向风先在低层最大风速半径以内有外流,以外有内流,在最大风速半径处为上升运动区并伴随强回波,而在气旋中心附近为下沉运动区。随后气旋中心回波和下沉运动逐渐增强,同时低层外流增强并扩散至最大风速半径外,相应的上升运动和强回波也移至最大风速半径外。切向风先呈现波数1的非对称结构,最大风速区位于气旋移动的左侧,且随高度有沿逆时针方向旋转的现象。随后显著增强,分布趋于对称,最大轴对称切向风达20 m/s位于约1 km高度。此后切向风速逐渐减弱,同时波数1非对称结构又有加强的趋势,最大风速区位于移动方向左前侧。上述中气旋的发展环境和过程,同其他地区非超级单体内中气旋发展非常一致,且其成熟期环流特征同台风结构也非常类似。不同之处在于其中心下沉运动及低层外流为降水所造成,且尺度和生命期均远小于台风。

至今为止,国外已针对对流风暴及伴随的中气旋做了大量的研究,并依照风暴类型和中气旋生成机制的不同,提出两类中气旋生成的概念模型。一类是Doswell和Lemon(1979)提出的伴随超级单体的中气旋。其典型的环境特征是大的垂直风切变和

对流不稳定性,生成机制是透过对流的上升运动将水平涡度倾斜效应,一般先在中层形成,随后向下发展。另一类是Wakimoto(1989)提出的非超级单体微气旋。这类气旋通常沿着中尺度边界层发展,如辐合线,切变带等,主要通过积云的上升运动对环境垂直涡度拉升产生。因此这类气旋通常先在低层生成随后向上发展。根据上述概念模型,下面对本文分析的中气旋特征及其母体风暴类型进行讨论。

本文中对流风暴生成的环境条件特征有:(1)发生在副热带海面上,当时环境为中等风切变不稳定(气旋发生前后0—5 km风切变分别为12 m/s和10 m/s,CAPE值分别为 $1613.6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 和 $1496.3 \text{ m}^2/\text{s}^2$);(2)处于两热带低压系统引起的一大尺度风切变辐合带附近。经计算体积理查逊数为98,显示此环境大气符合Weisman和Klemp 1982年研究中有利多单体风暴成长之环境。

多普勒雷达资料分析显示,此次分析的2004年9月10日的中气旋也是在一多单体的对流风暴中发展。其首先在低层生成,随后快速向上发展至8 km左右,维持时间超过2 h。在中气旋成熟期,其母体风暴呈现中纬度典型的超级单体的钩状回波特征,但在中高层并未呈现有界回波区和悬挂回波。根据Lemon(1977)提出的超级单体风暴回波模型,包括低层的钩状回波、中低层的有界回波和高层的悬垂回波,本文的中气旋母体风暴特征同典型的超级单体有显著差别。然而,仅从回波出发很难确定风暴的类型,Doswell和Burgess(1993)以动力特征为标准将超级单体定义为拥有持续、深厚的中气旋的对流风暴。如从此角度来看,似乎本文中的中气旋母体风暴属于超级单体。然而过去的观测显示超级单体中气旋起源于中层,然后向上、向下发展(Brown, 1973; Ray, 1975; Lemon, 1978; Brandes, 1978; Lemon, 1979)。最近的一些观测发现嵌在对流系统内的超级单体,其伴随的中气旋也是起源于中层(Funk, 1999)。尽管一些观测也注意到超级单体内中、低层中气旋同时存在且相互独立发展,但在风暴发展初期仍然是中层的中气旋强度比较强(Wakimoto, 1998; Ziegler, 2001)。而一系列针对超级单体风暴内中气旋生成机制的数值模拟(Weisman, 1982, 1984)和理论研究(Davies-Jones, 1984; Rotunno, 1985)显示超级单体内的中、低层的中气旋生成机制并不相同。中层中气旋是环境垂直风切变形成的水平涡管,经对流上升运动的倾斜作用而造成,而低层中气旋则是蒸发冷却

下沉气流与暖湿入流边界的斜压涡度,经下沉运动的倾斜作用形成。这是因为在对流上升运动区中近地面的垂直速度比较小,上升运动对环境涡度倾斜的效应也较小,因此最强的旋转产生在中层。反之,只有在下沉运动区中,才使得低层的涡度倾斜效应强于中层,强旋转发展在低层。由前面涡旋特征分析显示,本文的中气旋是起源于低层,随后向上发展,且在生成前并未观测到任何中层的气旋,这同超级单体中气旋的起源和发展过程并不相同。由于在气旋发展初期,中气旋内部主要是上升运动为主,环境风切变也为中等偏弱(中气旋发生前后的0—5 km环境风切变分别为12 m/s和10 m/s),因此可以推测上升运动对环境水平涡度的倾斜作用并非此中气旋生成的主要机制,否则最强旋转应在中层而非低层。综上所述,再结合其生成的环境,本文的中气旋不属于超级单体中气旋,其母体风暴属于非超级单体。

既然如此,那么本文的中气旋产生机制是什么?其发展过程是否满足 Wakimoto(1989)提出的非超级单体微气旋概念模式呢?事实上,前面的天气分析已揭示,本文中气旋发生在两个热带低压引起的风切变辐合线附近,因此环境存在一大尺度的边界。如果仔细分析雷达回波图可以注意到,2004年9月10日10:35—10:50 UTC,CKS雷达低仰角回波图(图5a—5e)上显示在雷达方位 220° — 250° ,距离25—80 km,有一条东西走向长度约55 km、宽度约为4 km的准静止线状回波,强度约为25 dBz,维持

高度约在2.5 km以下。该线状回波暗示此处低层存在一辐合边界,然而由于对应的径向风资料的缺乏,仍然无法确定该辐合带的存在。进一步分析连续的回波变化发现,本文研究的中尺度对流系统,在10:50 UTC之前在该线状回波北侧发展并向南运动,之后当对流系统11:05 UTC达到线状回波所在位置后,其移动方向则由向南逆时针转为向西北偏西。由此移动方向的转向推测,在线状回波两侧存在明显的环境风切变,在线状回波北侧为偏北风,而南侧为东南偏东风。对比06:00 UTC的天气分析(图2),可确定线状回波所在位置即为环境的风切变辐合线所在位置。此外,径向速度显示中气旋生成于10:35 UTC,此后快速加强并向上发展,至11:20 UTC达到成熟。这段时间正是其母体风暴移到环境风切变辐合线附近,也表明气旋的加强同环境的风切变辐合线有相当紧密的关系。综上,本文的中气旋生成过程,同 Wakimoto(1989)提出的非超级单体微气旋发展过程类似,主要是对流上升运动对环境垂直涡度拉升产生(图11)。另外,垂直风切变造成的水平涡度在上升气流作用下扭曲为垂直涡度可能对中气旋形成和发展也有一定贡献,但非主要机制。进一步由气旋成熟期的环流揭示,当中气旋进入成熟期,气旋中心出现降水并伴随明显的下沉运动和低层外流;随着降水加强,气旋中心被降水堵塞,且为强的下沉气流和径向风外流主导,气旋逐渐减弱,该过程也相当符合 Wakimoto(1989)的概念模式。

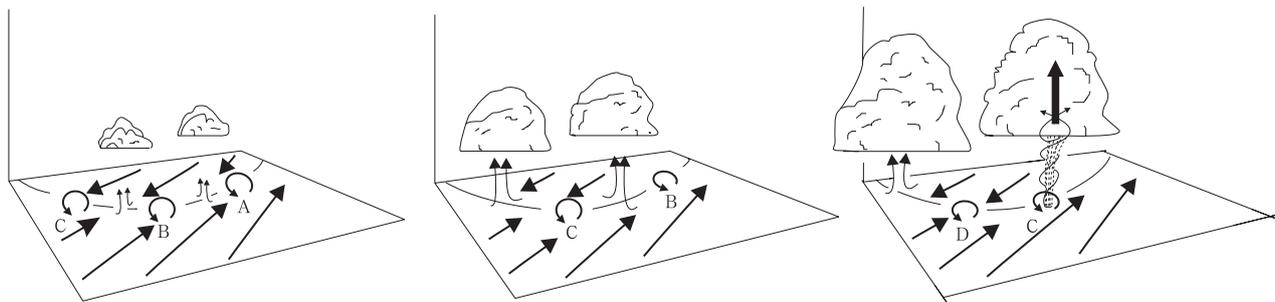


图11 非超级单体龙卷生成概念图(Wakimoto, 1989)

Fig. 11 Schematic model of the life cycle of the non-supercell tornado (Wakimoto1989)

References

- Andra D. 1994. Operational recognition of mesocyclones: Criteria and application//THE WSR-88-D Operator's Guide to Mesocyclone Recognition and Diagnosis, Appendix C., 1-5
- Atkins N T, Justin M Arnott, Ron W Przybylinski, et al. 2004. Vortex structure and evolution within bow echoes. Part I: Single-Doppler and damage analysis of the 29 June 1998 Derecho. Mon Wea Rev, 132(9): 2224-2242
- Burgess D W, Wood V T, Brown R A. 1982. Mesocyclone evolution statistics//Preprints, 12th Conf. on Severe Local Storms, San Antonio, TX, Amer Meteor Soc, 422-424
- Brandes E A. 1978. Mesocyclone evolution and tornadogenesis: Some observations. Mon Wea Rev, 1978, 106: 995-1011
- Brook H E, Doswell C A, Wilhelmson R B. 1994. The role of midtropospheric winds in the evolution and maintenance of low-

- level mesocyclones. *Mon Wea Rev*, 122: 126-136
- Brown R A, Wood V T. 1983. Improved severe storm warning using Doppler radar. *National Wea Digest*, 8(3): 19-27
- Brown R A, Burgess D W, Crawford K C. 1973. Twin tornado cyclones within a severe thunderstorm: Single-Doppler radar observations. *Weatherwise*, 26: 63-71
- Chisholm A J. 1973. Alberta hailstorms. Part I: Radar case studies and airflow models. *Amer Meteor Soc*, 36: 1-36
- Davies-Jones R P, Brooks H E. 1993. Mesocyclogenesis from a theoretical perspective // Church, et al. *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction and Hazards*, Geophys Monogr, No. 79. Amer Geophys Union, 105-114
- Davies-Jones R P. 1984. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms. *J Atmos Sci*, 41: 2991-3006
- DeWald V L, Funk T W, Kirkpatrick J D, et al. 1998. The 18 May 1995 squall line over south-central Kentucky: An examination of complex storm reflectivity trends and multiple mesocyclone development // Preprints, 16th Conf. on Weather Analysis and Forecasting, Phoenix, AZ, Amer Meteor Soc, 148-151
- Donaldson R J. 1970. Vortex signature recognition by a Doppler radar. *J Appl Meteor*, 9:661-670
- Doswell C A III, Burgess D W. 1993. Tornadoes and tornadic storms: A review of conceptual models // Church, et al. *The Tornado: Its Structure, Dynamics, Prediction, and Hazards*, Geophys Monogr, 79. Amer Geophys Union, 161-172
- Funk T W, Darmofal K E, Kirkpatrick J D, et al. 1999. Storm reflectivity and mesocyclone evolution associated with the 15 April 1994 squall line over Kentucky and southern Indiana. *Wea Forecasting*, 14: 976-993
- Fujita T T. 1958. Mesoanalysis of the Illinois tornadoes of 9 April 1953. *J Meteor*, 15: 288-296
- Fujita T T. 1973. Proposed mechanism of tornado formation from rotating thunderstorms // Preprints, Eighth Conf. on Severe Local Storms. Denver, CO, Amer Meteor Soc, 191-196
- Jou Jongdao, Chang Paoliang, Lee Wenchau. 1994. Analysis of typhoon circulation using ground based Doppler radar. *Atmos Sci (in Chinese)*, 1994, 22(2):163-187
- Lemon L R, Burgess D W, Brown R A. 1978. Tornadic storm airflow and morphology derived from single-Doppler radar measurements. *Mon Wea Rev*, 106: 48-61
- Lemon L R. 1977. New severe thunderstorm radar identification techniques and warning criteria: A preliminary report. NOAA Tech. Mem., NWS-NSSFC 1, 1977, 60pp. [NTIS No. PB-273049]
- Lemon L R, Doswell C A. 1979. Severe thunderstorm evolution and mesocyclone structure as related to tornadogenesis. *Mon Wea Rev*, 107: 1184-1197
- Lee W C, Jou J D, Chang P L, et al. 1999. Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part I: Interpretation of Doppler velocity patterns and the GBVTD technique. *Mon Wea Rev*, 127: 2419-2439
- Lee W C, Marks F D. 2000. Tropical cyclone kinematic structure retrieved from single-Doppler radar observations. Part II: The GBVTD-simplex center finding algorithm. *Mon Wea Rev*, 128: 1925-1936
- Liu Shuyuan, Sun Jian, Yang Yinming. 2007. Structural analysis of meso-scale convective systems in the squall line process on 12 July 2004 in Shanghai. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 65(1):84-93
- Marks F D, Houze R A. Inner core structure of Hurricane Alicia from Doppler radar observations. *J Atmos Sci*, 1987, 44: 1296-1317
- Milne-Thomson L M. 1968. *Theoretical Hydrodynamics*, 5th ed. Macmillan, 355pp
- Ray P S, et al. 1975. Dual-Doppler observation of a tornadic storm. *J Appl Meteor*, 14: 1521-1530
- Rotunno R, Klemp J B, Weisman M L. 1985. On the rotation and propagation of simulated supercell thunderstorms. *J Atmos Sci*, 42: 271-292
- Trapp R J. 1999. Observations of nontornadic low-level mesocyclones and attendant tornadogenesis failure during VORTEX. *Mon Wea Rev*, 127: 1693-1705
- Trapp R J, Weisman M L. 2003. Low-level mesovortices within squall lines and bow echoes. Part II: Their genesis and implications. *Mon Wea Rev*, 131: 2804-2823
- Wakimoto R M, Liu C, Cai H. 1998. The Garden City, Kansas, storm during VORTEX 95. Part I: Overview of the storm life cycle and mesocyclogenesis. *Mon Wea Rev*, 126: 372-392
- Wakimoto R M, Wilson J W. 1989. Non-supercell tornadoes. *Mon Wea Rev*, 117: 1113-1140
- Weisman M L, Klemp J B. 1982. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy. *Mon Wea Rev*, 110: 504-520
- Weisman M L, Klemp J B. 1984. The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears. *Mon Wea Rev*, 112: 2479-2498
- Zheng Yuan Yuan, Yu Xiaoding, Fang Zhong, et al. 2004. Analysis of a strong classic supercell storm with Doppler weather radar data. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2004, 62(3):317-238
- Zhou Haiguang, Wang Yubin. 2005. Structure of meso- β and - γ scale on meiyu in Huaihe river basin on 30 June, 2003 by dual-Doppler radar. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 63(3):301-312
- Zhu Junjian, Zheng Guoguang, Wang Ling, et al. 2004. The air flow and the large-hail generation area in hailstorms. *J Nanjing Institute of Meteor (in Chinese)*, 27(6): 735-742
- Ziegler C L, Rasmussen E N, Shepherd T R, et al. 2001. The evolution of low-level rotation in the 29 May 1994 Newcastle-Graham, Texas, storm complex during VORTEX. *Mon Wea Rev*, 129: 1339-1368

附中文参考文献

- 周仲岛, 张保亮, 李文兆. 1994. 多普勒雷达在台风中心定位于最大风速半径决定的应用. *大气科学*, 22(2): 163-187
- 刘淑媛, 孙健, 杨引明. 2007. 上海 2004 年 7 月 12 日飚线系统中尺度分析研究. *气象学报*, 65(1): 84-93
- 郑媛媛, 俞小鼎, 方口等. 2004. 一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析. *气象学报*, 62(3): 317-238
- 周海光, 王玉彬. 2005. 2003 年 6 月 30 日梅雨锋大暴雨 β 和 γ 中尺度结构的双多普勒雷达反演. *气象学报*, 63(3):301-312
- 朱君鉴, 郑国光, 王令等. 2004. 冰雹风暴中的流场结构及大冰雹生成区. *南京气象学院学报*, 27(6): 735-742